

УДК 621.983.044

Ю.Г. Розов

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА ВОЗНИКНОВЕНИЕ ПРОДОЛЬНЫХ СКЛАДОК В ОЧАГЕ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОБЖИМЕ ТОНКОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ОБОЛОЧЕК

Представлено результати теоретичного аналізу процесу обжиму тонкостінної циліндричної оболонки в матрицях з конічною і криволінійною утворюючими, основна увага в якому приділена визначенню граничних умов, при яких імовірно утворення подовжніх складок. Показано, що імовірність утворення подовжніх складок зменшується зі збільшенням коефіцієнта тертя, а також при обжиму трубної заготовки у матриці з криволінійною утворюючою, і, навпаки, зростає зі збільшенням різновисочинності стінки трубної заготовки в тангенціальному (широтному) напрямку. Отримані в результаті теоретичного аналізу залежності зручні для інженерних розрахунків і враховують вплив різних факторів на процес втрати стійкості з утворенням подовжніх складок у вогнищі деформації при обжиму тонкостінних циліндричних оболонок, що підтверджується результатами експериментів.

Введение. Одной из причин, ограничивающих использование операций обжима тонкостенных цилиндрических оболочек в современной металлообрабатывающей промышленности, является потеря устойчивости заготовок в процессе деформирования, заключающаяся в возникновении продольных складок в зоне деформации. Факторы, оказывающие влияние на процесс складкообразования, к сожалению, до настоящего времени изучены не достаточно, а рекомендации по осуществлению обжима без ограничений носят приближенный характер и не подкреплены соответствующими аналитическими зависимостями, удобными для инженерных расчетов.

С целью получения таких зависимостей, был проведен теоретический анализ процесса обжима тонкостенной цилиндрической оболочки в матрицах с конической и криволинейной образующими, основное внимание в котором было уделено определению предельных условий, при которых вероятно образование продольных складок.

Обжим в конической матрице.

Рассмотрим равновесие бесконечно малого элемента заготовки на кромке, ограниченного центральным элементарным углом $d\varphi$, длина образующей которого равна $\frac{d\rho}{\sin \alpha}$ (Рис.1).

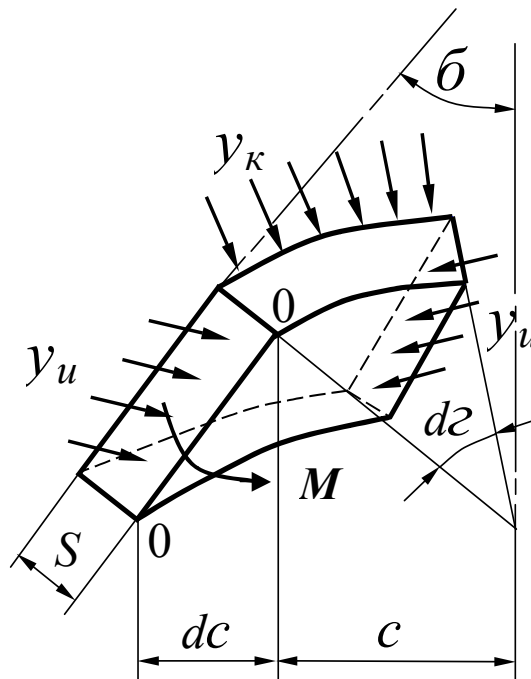


Рис.1.

Примем, что нормальные напряжения σ_K , действующие на контактной поверхности рассматриваемого участка, и тангенциальные напряжения σ_θ , действующие по боковым поверхностям выделенного элемента, распределены равномерно. Примем также, что кривизна срединной поверхности в широтном направлении в месте образования продольной складки определяется действием изгибающего момента M и сил, образованных напряжениями σ_K и σ_θ , и что величина этой кривизны определяется условием равенства момента M и моментов, создаваемых элементарными силами, образованными напряжениями σ_K и σ_θ . Для определения изгибающего момента M используем формулу в виде [1]:

$$M = \frac{\sigma_S S^2}{4}.$$

Уравнение равновесия, выраженное через моменты относительно сечения 0-0, выразится:

$$\sigma_\theta \frac{d\rho}{\sin \alpha} S(1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos \alpha} + S \frac{\sigma_\theta}{\rho} \cos \alpha \frac{d\rho}{\sin \alpha} d\gamma \rho \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) + \frac{\sigma_S S^2}{4} \frac{d\rho}{\sin \alpha} = 0 \quad (1)$$

Подставив (при малых значениях угла $d\gamma$)

$$1 - \cos(d\gamma) = \frac{(d\gamma)^2}{2}; \quad \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) = \frac{d\gamma}{2},$$

с учетом условия пластичности $\sigma_\theta = -\sigma_S$, и решая относительно $d\gamma$, получим:

$$d\gamma = \sqrt{\frac{S \cos \alpha}{2\rho (1 + \cos^2 \alpha)}}. \quad (2)$$

Определим условия, при которых **возможно** возникновение продольных складок, для чего рассмотрим потерявший устойчивость край заготовки со сформировавшимися складками, имеющими минимально возможную длину полуволны (рис.2). Принимая постоянство площади сечения краевой части заготовки на протяжении всего процесса складкообразования, ввиду его кратковременности, определим площадь сечения одной полуволны складки $F_{СКЛ}$ (допускаем при этом, что полуволна принимает форму полукруга).

С учетом рис. 2:

$$F_{СКЛ} = \frac{1}{2} \pi S^2 + \frac{21}{4} \pi S^2 = \pi S^2.$$

С учетом принятого постоянства площади сечения, определим длину в широтном направлении элемента края заготовки толщиной S , из которого формируется складка (на рисунке 2 изображен тонкой линией).

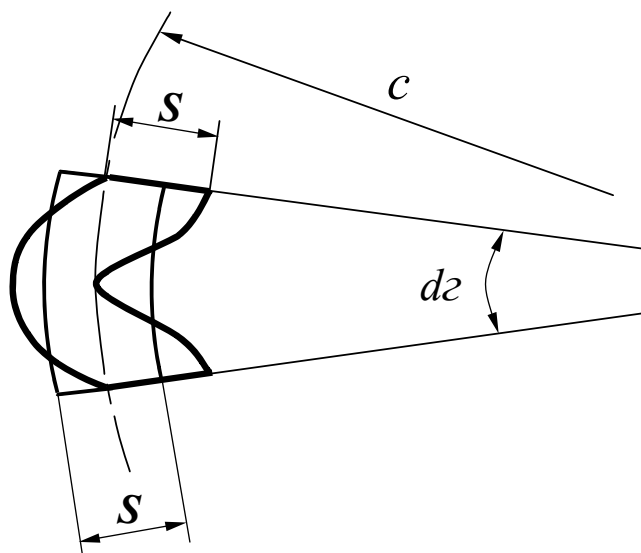


Рис. 2.

С учетом принятых обозначений:

$$d\gamma \rho = \frac{F_{СКЛ}}{S} = \pi S.$$

Очевидно, что возникновение продольных складок в деформированной части заготовки **возможно** при выполнении условия:

$$d\gamma\rho \geq \pi S. \quad (3)$$

С учетом (2):

$$\sqrt{\frac{\rho S \cos \alpha}{2(1 + \cos^2 \alpha)}} \geq \pi S. \quad (4)$$

Решая последнее неравенство относительно $\cos(\alpha)$, получим:

$$\cos \alpha \geq 2\pi^2 \frac{S}{\rho}. \quad (5)$$

Ввиду того, что ρ и S – размеры заготовки на кромке в зоне обжима и очевидны соотношения $\rho < R_3$, $S > S_3$, то **условия устойчивости** заготовки могут быть представлены в виде:

$$\cos \alpha < 2\pi^2 \frac{S_3}{R_3} \text{ или } \frac{S_3}{R_3} > \frac{\cos \alpha}{2\pi^2}. \quad (6)$$

Условия устойчивости, выраженные неравенствами (6), не учитывают влияние трения на процесс образования продольных складок в очаге деформации. Однако, опытами установлено, что вероятность продольного складкообразования увеличивается с уменьшением коэффициента трения и наоборот. Это объясняется тем, что силы трения затрудняют тангенциальное смещение элементов заготовки в зоне обжима и, следовательно, затрудняют образование продольных складок.

С учетом сил контактного трения, уравнение равновесия (1) выразится:

$$\begin{aligned} \sigma_\theta \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} S(1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} - \mu S \frac{\sigma_\theta}{\rho} \cos(\alpha) \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} d\gamma \rho (1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} + \\ + S \frac{\sigma_\theta}{\rho} \cos(\alpha) \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} d\gamma \rho \operatorname{tg}\left(\frac{d\gamma}{2}\right) + \frac{\sigma_s S^2}{4} \frac{d\rho}{\sin(\alpha)} = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

или, после сокращений:

$$(d\gamma)^2 \frac{1}{\cos(\alpha)} - (d\gamma)^3 \mu + (d\gamma)^2 \cos(\alpha) - \frac{S}{2\rho} = 0.$$

Придерживаясь ранее принятой методики, приняв допущения, с некоторым преувеличением степени влияния сил трения, получим **условия устойчивости** заготовки, с учетом влияния трения, в виде:

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S}{\rho}}{1 + \mu 2\pi^2 \frac{S}{\rho}} \text{ или } \frac{S}{\rho} > \frac{\cos(\alpha)}{2\pi^2(1 - \mu \cos(\alpha))}, \quad (8)$$

или, по аналогии с формулой (6):

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \mu 2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}} \text{ или } \frac{S_3}{R_3} > \frac{\cos(\alpha)}{2\pi^2(1 - \mu \cos(\alpha))}. \quad (9)$$

Полученные неравенства (8) и (9) подтверждают описанное выше влияние сил трения на тангенциальное смещение элементов заготовки относительно инструмента и, как следствие, на вероятность образования продольных складок.

Обжим в матрице с криволинейной образующей постоянной кривизны ($R_\rho = \text{const}$).

Уравнение равновесия бесконечно малого элемента заготовки на кромке, ограниченного центральным элементарным углом $d\gamma$, длина образующей которого равна $R_\rho d\alpha$ (см. рис.3):

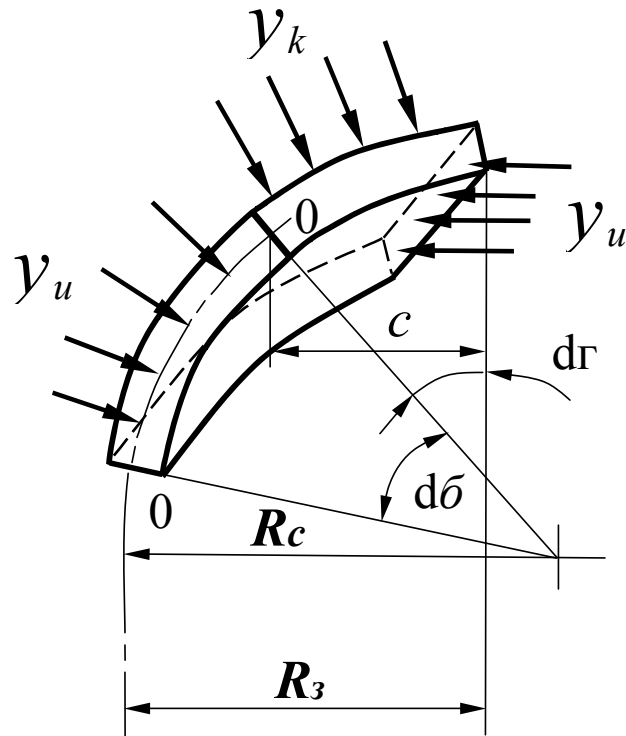


Рис. 3.

$$\sigma_{\theta} R_{\rho} d\alpha S (1 - \cos(d\gamma)) \frac{\rho}{\cos(\alpha)} + S \left(\frac{\sigma_{\theta}}{\rho} \cos(\alpha) + \frac{\sigma_{\rho 0}}{R_{\rho}} \right) d\alpha d\gamma \rho \operatorname{tg} \left(\frac{d\gamma}{2} \right) + \frac{\sigma_S S^2}{4} R_{\rho} d\alpha = 0, \quad (10)$$

где для определения меридионального напряжения $\sigma_{\rho 0}$, действующего на краю деформируемой части заготовки (где, как известно, $\sigma_{\rho 0} \approx 0$), учитываем только изменение кривизны элемента заготовки в меридиональном сечении от нуля до $\frac{1}{R_{\rho}}$ [1]:

$$\sigma_{\rho 0} = \frac{\sigma_S S}{4 R_{\rho}}.$$

Тогда, подставив (при малых значениях угла $d\gamma$)

$$1 - \cos(d\gamma) = \frac{(d\gamma)^2}{2}; \quad \operatorname{tg} \left(\frac{d\gamma}{2} \right) = \frac{d\gamma}{2},$$

с учетом условия пластичности $\sigma_{\theta} = -\sigma_S$, и решая относительно $d\gamma$, получим:

$$d\gamma = \frac{\sqrt{\frac{S}{2\rho} \frac{\cos(\alpha)}{1 + \cos^2(\alpha) - \cos(\alpha) \frac{S\rho}{4R_{\rho}^2}}}}{1}.$$

По аналогии с анализом процесса деформирования в конической матрице, определяем **условия устойчивости** заготовки по условию образования продольных складок, выраженные через переменный угол α :

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S}{\rho}}{1 + \frac{1}{2} \pi^2 \frac{S^2}{R_{\rho}^2}} \quad \text{или} \quad \frac{S}{\rho} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} \right], \quad (11)$$

где (см. рис.4) $\cos(\alpha) = \frac{R_{\rho} - R_3 + \rho}{R_{\rho}}$.

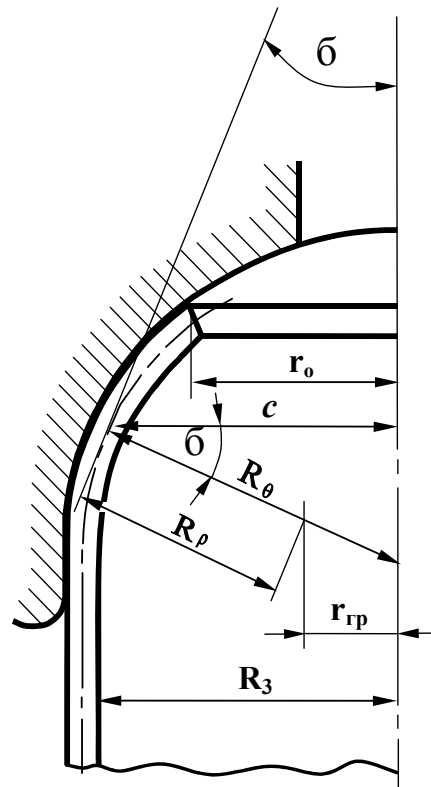


Рис. 4.

При выводе последнего неравенства принято допущение $R_p = \frac{\rho}{\cos(\alpha)}$, несколько уменьшающее степень влияния меридиональных напряжений.

С учетом исходных размеров трубной заготовки, условия устойчивости выразятся:

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \frac{1}{2}\pi^2 \frac{S_3^2}{R_p^2}} \text{ или } \frac{S_3}{R_3} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left[1 - \sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} \right], \quad (12)$$

где $\cos(\alpha) = \frac{R_p - R_3 + r_0}{R_p}$.

С учетом влияния трения (придерживаясь принятой методики), условия устойчивости выразятся:

$$\cos(\alpha) < \frac{2\pi^2 \frac{S_3}{R_3}}{1 + \pi^2 \left(\frac{1}{2} \frac{S_3^2}{R_p^2} + 2\mu \frac{S_3}{R_3} \right)}$$

$$\text{или } \frac{S_3}{R_3} > \frac{2}{\cos^3(\alpha)} \left(1 - \left[\sqrt{(1 - \mu \cos(\alpha))^2 - \frac{1}{2} \left(\frac{\cos^2(\alpha)}{\pi} \right)^2} + \mu \cos(\alpha) \right] \right), \quad (13)$$

где $\cos(\alpha) = \frac{R_p - R_3 + r_0}{R_p}$.

Проверка выполнения условий устойчивости с помощью неравенств (12) и (13) проводится в следующей последовательности: по заданным размерам заготовки (S_3 , R_3), детали (r_0), матрицы (R_p)

и значению коэффициента трения μ (при использовании неравенств (13)) определяются левые и правые части неравенств (12), (13) и проверяется их выполнение (в случае невыполнения неравенств, рекомендуется увеличить относительную толщину заготовки $\frac{S_3}{R_3}$ или использовать матрицу с меньшим радиусом кривизны образующей R_p).

Основные выводы:

– полученные в результате теоретического анализа зависимости удобны для инженерных расчетов и, не смотря на принятые допущения, отражают истинную картину, с точки зрения влияния различных факторов на процесс потери устойчивости с образованием продольных складок в очаге деформации при обжиге тонкостенных цилиндрических оболочек, что подтверждается результатами экспериментов;

– вероятность образования продольных складок уменьшается с увеличением коэффициента трения, так как при этом затрудняется тангенциальное смещение элементов заготовки относительно инструмента;

– вероятность образования продольных складок меньше при обжиге трубной заготовки в матрице с криволинейной образующей. Это объясняется тем, что в этом случае элементы заготовки прижимаются к поверхности матрицы действием как тангенциального σ_θ , так и меридионального σ_p напряжений;

– анализ неравенства (5) позволяет сделать вывод, что вероятность образования продольных складок возрастает с увеличением разнотолщинности стенки трубной заготовки в тангенциальном (широтном) направлении (локальное уменьшение толщины S_3 приводит, в свою очередь, к уменьшению правой части неравенства (5), что дает основание делать подобный вывод).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. – М.: Машиностроение, 1977. – 278 с.

РОЗОВ Юрий Георгиевич – к.т.н., доцент, проректор по учебной работе Херсонского национального технического университета

Научные интересы:

– разработка и исследование ресурсосберегающих технологий в области обработки металлов давлением;

– общие вопросы методологии высшего образования.